

Mgr inż. Aleksandra NOWAKOWSKA

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ



PT. MODELOWANIE PRZEPŁYWU PŁYNÓW NIENEWTONOWSKICH W ZAKRESIE MINIMALIZACJI STRAT ENERGII

DYSCYPLINA: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

Promotor: **Prof. Dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak**

Promotor pomocniczy: **Dr inż. Bartosz Ziegler**

POZNAŃ 2024

1. Uzasadnienie celowości tematu

Problematyka przepływu płynów jest przedmiotem aktywnej działalności wielu naukowców. W zależności od rodzaju płynu, a także środowiska jego występowania oraz przeznaczenia, konieczne jest wieloaspektowe rozpoznanie problemu. Zbadanie przepływu płynu i jego właściwości umożliwia ilościowy opis zjawisk przepływowych zachodzących w maszynach, urządzeniach i systemach stosowanych w praktyce inżynierskiej.

Omówienie problemów przepływowych w instalacjach, maszynach, urządzeniach przepływowych oraz ich elementach jest istotne dla inżynierów zajmujących się tymi zagadnieniami. Mechaniką płynów „rządzą” te same prawa co mechaniką ciała stałego. Jednakże zagadnienia równowagi i ruchu płynów są nieco bardziej złożone. Wynika to głównie z właściwości płynów rzeczywistych, gdyż metody teoretyczne należy uzupełnić o metody doświadczalne. Weryfikacja doświadczalna odgrywa więc istotną rolę w mechanice płynów, ponieważ analiza matematyczna opisująca zachowanie się płynów rzeczywistych umożliwia jedynie ogólne rozpoznanie ich natury.

W celu ulepszenia procesów przepływowych substancji takich jak woda, oleje, gaz, para, a także farby, kleje czy produkty spożywcze, rozwiązuje się zagadnienia teoretycznej i doświadczalnej mechaniki płynów. Mechanika cieczy i gazów tworzy naukowe, użyteczne i rzeczowe podstawy w dziedzinach specjalistycznych z zakresu energetyki, inżynierii środowiska, lotnictwa, chłodnictwa, transportu rurociągowego oraz inżynierii chemicznej. Każdy proces przepływu płynu wymaga indywidualnego podejścia. Jest to podyktowane właściwościami badanego układu.

Przepływ płynu jest nierozdzielnie związany z transportem energii. Podczas ruchu płyn wytraca energię na skutek strat liniowych i miejscowych. Ograniczenie tych strat rzutuje na możliwość zadania płynowi mniejszej energii na wlocie. Zależnie od substancji, oszczędności te mogą być ograniczone lub znaczące. W związku z tym postanowiono zweryfikować, czy jest możliwe obniżenie strat energii przepływającego płynu w wytypowanym, rzeczywistym układzie. Na potrzeby badań wybrano środowisko tworzyw sztucznych – polipropylen wraz z reometrem kapilarnym. Złożoność problemów przepływowych jest potęgowana przez podjęcie tematu przepływu płynów nienewtonowskich, które wymagają dodatkowych założeń ze względu na ich zmienną lepkość podczas przepływu. Zmienna lepkość determinowana jest przez siły międzycząsteczkowe płynu, a ta zależna jest głównie od szybkości przepływu. Szybkość przepływu płynu zależna jest między innymi od zadanego ciśnienia oraz kształtu kanału, w jakim porusza się płyn.

Zużycie energii to jeden z najważniejszych parametrów branych pod uwagę podczas projektowania i wykonywania procesów technologicznych. Efektywność energetyczna dotycząca procesów przemysłu przetwórczego to jedno z kluczowych zagadnień ostatnich lat, głównie ze względu na rosnące koszty energii oraz wpływ na środowisko. Dążenie do zmniejszenia zużycia energii w przedsiębiorstwie to nie tylko korzyści ekonomiczne, ale również wzrost efektywności środowiskowej wytwarzanych produktów.

Celem pracy jest uzyskanie zmniejszenia strat ciśnienia podczas przepływu wybranego płynu nienewtonowskiego, jakim jest polipropylen. Kanały i przewody, przez które przepływają polimery, mają zazwyczaj kształt opisany funkcją ciągłą z pierwszą pochodną oraz funkcją ciągłą, przy braku ciągłości pierwszej pochodnej w wybranych punktach. Dlatego konieczne jest opracowanie zmodyfikowanego kształtu dyszy. Pozwoli to na zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu. Modyfikacja kształtu dyszy może prowadzić do zmniejszenia oporów przepływu. Dłużej pozostające w układzie tworzywo i większe ciśnienie powoduje wzrost generowania ciepła poprzez tarcie. Ponadto, długie przebywanie w dyszy przy jednoczesnym większym ciśnieniu tworzywa może powodować degradację mechaniczną i cieplną tworzywa, co pogarsza jakość wytłoczyny oraz ogranicza możliwość powtórnego przetwórstwa.

2. Wyszczególnienie tez

W rozprawie wyszczególniono trzy naczelne tezy. Pierwsza z nich, co do ważności, uzyskuje następujące brzmienie: „Poprawa kształtu dyszy spowoduje zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu”. Drugą, równie ważną tezę sformułowaną w pracy jest stwierdzenie: „Poprawa kształtu dyszy spowoduje ograniczenie zalegania płynu przepływającego przez dyszę”. Jest to zagadnienie o tyle istotne, iż zalegający w kanale płyn staje się barierą dla kolejnych przepływających warstw płynu, co rzutuje na straty ciśnienia. Trzecią postawioną w pracy tezę jest stwierdzenie: „Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia wykazuje korzystniejsze parametry przepływu niż ma to miejsce w przypadku kanału zbieżnego opisanego równaniem liniowym.

Aby zweryfikować postawione założenia, wyszczególniono szereg zadań do wykonania. Są one następujące:

- wykonanie stanowiska do wizualizacji przepływu płynu,
- przeprowadzenie symulacji numerycznych przepływu płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał zbieżny,

- badanie zachowania się płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał opisany wielomianem III stopnia za pomocą symulacji numerycznych,
- opracowanie dysz o zmodyfikowanej geometrii, które można umieścić w reometrze,
- porównanie wyników badań symulacyjnych i wizualizacyjnych z badaniami dysz w reometrze.

Wykonanie stanowiska do wizualizacji przepływu płynu pozwoli na pogłębione zidentyfikowanie problemu oraz wskaże miejsca najbardziej newralgiczne podczas przepływu. Przeprowadzenie symulacji numerycznych pozwoli potwierdzić wyniki eksperymentu wizualizacyjnego. Badanie zachowania się płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał wielomianowy przy wykorzystaniu metod numerycznych wskaże na zasadność zastosowania zmodyfikowanej geometrii dyszy. Opracowanie dysz o zmodyfikowanej geometrii przeznaczonych do zainstalowania w reometrze pozwoli na zbadanie rzeczywistego przepływu płynu przez zadany kształt. Porównanie wyników badań symulacyjnych i wizualizacyjnych z badaniami dysz w reometrze pozwoli na uzyskanie jakościowych i ilościowych danych oraz na wyciągnięcie wniosków dotyczących przeprowadzonych działań.

3. Metody doboru materiałów wraz z ich uzasadnieniem

Pierwszym krokiem w kierunku sformułowania celowości badań oraz hipotez badawczych było przeprowadzenie symulacji z elementami wizualizacji. Metoda wizualizacji przepływu pozwala na bezpośrednią obserwację zachowania się płynu w różnych warunkach. W związku z tym podjęto próbę utworzenia stanowiska wizualizującego przepływ płynu przez dysze o różnych kształtach. Wynik badania pozwolił na uzyskanie pewnych danych jakościowych, ale nie uzyskano żadnych danych ilościowych w postaci chociażby rozkładu ciśnienia. Eksperyment pozwolił jednakże na sformułowanie hipotez oraz sprecyzowanie dalszych działań.

Kolejnym istotnym zagadnieniem procesu był wybór substancji. W celu prawidłowego i mało uciążliwego przeprowadzenia badań, konieczny był dobór odpowiedniego płynu. Postanowiono wybrać do badań płyn nienewtonowski ze względu na powszechność jego występowania w wielu dziedzinach życia. Poszukiwania rozpoczęto od płynów biologicznych – krwi, następnie poprzez słoną wodę morską z elementami tworzywa sztucznego, aż po polimery.

Pierwszym z wyróżnionych do weryfikacji płynów była krew. Cechuje się ona gęstością podobną do wody, dzięki czemu wyniki wizualizacji mogłyby zostać odniesione do przepływu

tego właśnie płynu. Wyniki wizualizacji mogłyby być następnie wykorzystane w badaniach przepływowych przez naczynia krwionośne. Jednakże ze względu na wymagania techniczne, jakie niesie za sobą weryfikacja przepływu krwi (konieczność utrzymania płynu w niskiej temperaturze), niezbędne było podjęcie dalszych poszukiwań.

Kolejnym z wytypowanych płynów nienewtonowskich możliwych do zastosowania na stanowisku wizualizacyjnym i badawczym jest woda morska o znacznym zasoleniu, której nienewtonowski charakter potęguje występowanie alg i sinic wydzielających polimerowe substancje. Niestety znaczna odległość od źródła naturalnego środowiska badań wymusza porzucenie tego materiału jako płynu badawczego.

Następną substancją, wytypowaną dzięki podjęciu współpracy z Zakładem Technologii Polimerów i Powłok Ochronnych Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, został polimer z grupy poliolefin, czyli polipropylen. Materiał ten w temperaturze pokojowej jest ciałem stałym, jednak w podwyższonej temperaturze, staje się płynem nienewtonowskim. Polipropylen jest materiałem popularnym i łatwo dostępnym. Posiada on także właściwości odpowiednie do tego, by wykorzystać go w badaniach numerycznych i eksperymentalnych, gdyż cechuje się łatwą obróbką oraz dużą wytrzymałością termiczną i mechaniczną. Przeprowadzenie eksperymentu na stanowisku badawczym z wykorzystaniem polipropylenu wymaga podgrzania materiału do odpowiedniej temperatury. Jest to możliwe do zrealizowania dzięki podjętej z Politechniką Bydgoską współpracy, w ramach której możliwe było skorzystanie z tamtejszej aparatury pomiarowej.

Badanie złożonego procesu przepływu przez wybrany kanał tworzywa sztucznego pozostającego w stanie ciekłym wymagało przeprowadzenia analiz pod kątem zachowania się płynów nienewtonowskich w ruchu. Dlatego konieczne było dokonanie rozpoznania w temacie modeli przepływowych płynów nienewtonowskich. Zależnie od rodzaju płynu (rozrzedzany ścinaniem, zagęszczany ścinaniem, itp.) należało dobrać odpowiedni model przepływu. W tym celu poszukiwania rozpoczęto wśród publikacji poświęconych zagadnieniom porównywania modeli dedykowanych dla płynów nienewtonowskich.

Kolejnym krokiem było teoretyczne opracowanie nowego kształtu dysz, który umożliwi zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu. W tym celu dokonano analizy istniejącego kształtu opisanego funkcją liniową i na podstawie obliczeń utworzono wielomianowy kształt dyszy, którego parametry wlotowe i wylotowe odpowiadały dyszy bazowej.

Badanie wizualizacyjne, dobór materiału i odpowiedniego modelu lepkości płynu oraz opracowanie nowej geometrii umożliwiło kontynuację badań w postaci wykonania symulacji numerycznej w programie wspomagającym obliczenia inżynierskie Ansys Fluent. Podjęcie badań w układzie rzeczywistym poprzedzono badaniami symulacyjnymi, aby wyeliminować ewentualne błędnie postawione założenia, w wyniku których mogłoby dojść do wykonania dysz o nieergonomicznym kształcie. Badania wizualizacyjne znalazły potwierdzenie w badaniach symulacyjnych, dlatego można było kontynuować wykonywanie wyznaczonych zadań.

Wybrany do badań rzeczywistych urządzeniem był reometr kapilarny, gdyż pozwala on na uzyskanie wiarygodnych danych pomiarowych. Reometr kapilarny jest jednym z najczęściej stosowanych urządzeń wykorzystywanych do badania właściwości polimerów. Można dzięki niemu uzyskać między innymi wyniki w postaci lepkości substancji oraz siły tłoka działającego na materiał. Siłę działającego tłoka można następnie przeskalać na wartość ciśnienia działającego na materiał. Różnica między ciśnieniem wlotowym a wylotowym to wynik całkowitej straty ciśnienia przepływającego płynu. Dobór odpowiedniego materiału pozwolił na wykonanie właściwego procesu badawczego, czyli przepływu polipropylenu przez kanał zbieżny w postaci dyszy umieszczonej w reometrze kapilarnym. Wyniki ilościowe pozyskane z symulacji w programie porównano z wynikami badań wykonanych w reometrze kapilarnym.

4. Metody badawcze wraz z ich uzasadnieniem

W rozprawie zastosowano kilka metod badawczych, czyli czynności i sposobów dążących do zdobycia materiałów do badań będących podstawą opracowania określonego tematu. Na początku zastosowano metodę obserwacji podczas wizualizacji przepływu płynu na stanowisku wyposażonym w kanał, pompę i wodę z opiłkami proszku aluminiowego. Obserwowano, w jaki sposób kształt kanału wpływa na przepływ. Metoda ta potwierdziła konieczność przeprowadzenia dalszych badań eksperymentalnych. Następnie zastosowano metodę analizy literatury, dzięki której dobrano odpowiedni do badań materiał płynny oraz model lepkości.

Kolejną zastosowaną metodą była metoda eksperymentalna wykonana w programie komputerowym przeznaczonym do symulacji zjawisk przepływowych oraz na stanowisku laboratoryjnym. Wyniki eksperymentu komputerowego oraz wyniki w warunkach rzeczywistych na urządzeniu laboratoryjnym poddano następnie metodzie statystycznej – wyniki badań zostały zebrane, zgromadzone, a następnie opracowane tak, by można było wyciągnąć stosowne wnioski.

5. Znaczenie praktyczne i teoretyczne pracy doktorskiej według opinii doktoranta

Wyroby i elementy z tworzyw sztucznych są wykorzystywane na każdym kroku w wielu dziedzinach i gałęziach gospodarki. Kompozyty tworzyw sztucznych są obecne w codziennym funkcjonowaniu człowieka. Wszelkie urządzenia elektryczne i elektroniczne, takie jak laptopy, telefony, sprzęty AGD, a także pojazdy, elementy infrastruktury, meble, materiały budowlane, pojemniki na żywność, produkty chemiczne oraz wiele innych elementów codziennego użytku są zbudowane z tworzyw sztucznych bądź posiadają elementy wykonane z polimerów i ich pochodnych. Tak powszechne stosowanie wymaga wykorzystywania do produkcji tychże elementów odpowiednich maszyn i urządzeń. Ze względu na coraz większe restrykcje związane z ochroną środowiska podejmowane są próby bardziej ekologicznego wytwarzania wszelkich dóbr. Dzięki powszechności tworzyw sztucznych oraz używanych do ich przetwórstwa i wytwarzania wtryskarek i wylączarek zastosowanie bardziej ergonomicznego kształtu dyszy jest wskazane. Wylączarki i wtryskarki to urządzenia wykorzystywane także w wielu innych gałęziach przemysłu. Za ich pośrednictwem, po odpowiednim dostosowaniu do potrzeb przedsiębiorstwa, można nimi przetłaczać inne media, które bardzo często posiadają właściwości płynu nienewtonowskiego. Dlatego proponowane w rozprawie udoskonalenie może dać efekty w postaci zysków energetycznych także w innych gałęziach przemysłu i przetwórstwa.

Energia potrzebna do przetłoczenia płynu to jedynie ułamek wartości energii, która jest potrzebna na zasilenie innych elementów składających się na urządzenia do przetłaczania. Jednakże ze względu na aspekty ekologiczne szuka się możliwych ulepszeń i oszczędności na każdym polu. Badania innych autorów, które opisano w części pracy, przeprowadzone na rzecz ulepszenia wtryskarek i wylączarek wskazują, że istnieje potrzeba poprawy parametrów wylączania na wielu polach i w wielu elementach wtryskarek i wylączarek.

Praca ma na celu dążenie do zmniejszenia strat ciśnienia przy przepływie płynu nienewtonowskiego. Problem badawczy rozwiązano poprzez zmodyfikowanie geometrii kanału na kilka sposobów. Przeprowadzono eksperyment wizualizacyjny nakreślający charakter problemu. Wykonano również symulacje numeryczne w programie pozwalającym na badanie mechaniki płynów omawianego przypadku. Dodatkowo, podjęto się również badania na stanowisku laboratoryjnym – reometrze kapilarnym – w warunkach rzeczywistych. Zastosowanie kilku metod pozwoliło na bardziej poprawną weryfikację wyników. Potwierdzono tezę, iż poprawa kształtu dyszy spowodowała zmniejszenie zalegania materiału

przepływającego przez kanał zbieżny. Potwierdzono także brak wpływu zmiany kształtu na degradację wybranej substancji. Poprawa kształtu dyszy spowodowała zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu.

Dzięki przeprowadzeniu obserwacji i pomiarów przy użyciu stanowiska wizualizacyjnego, symulacji numerycznej oraz badaniu reometrem kapilarnym z autorskimi dyszami stwierdzono, że wyniki są zbieżne dla wybranych metod. Wykazane w pracy udoskonalenie w postaci modyfikacji kształtu dyszy, może być szeroko stosowane w maszynach wytłaczarskich, wtryskarkach i prasach, które współpracują z płynami nienewtonowskimi.

6. Struktura rozprawy

W rozdziale pierwszym wyjaśnione zostały najważniejsze pojęcia związane z płynami nienewtonowskimi. Przedstawiono podział płynów nienewtonowskich oraz omówiono poszczególne ich rodzaje. Opisano również problem lepkości płynów nienewtonowskich i wyszczególniono najczęściej wykorzystywane modele reologiczne. W rozdziale tym zawarto również wybrane metody badania płynów.

Rozdział drugi zawiera analizę dotychczasowego stanu zagadnienia, opracowaną na podstawie prac badawczych oraz publikacji naukowych. Omówiono tematykę dotyczącą pojęcia reologii i przepływu krwi. Poruszono także kwestię właściwości wody morskiej jako płynu nienewtonowskiego. W dalszym etapie rozważaniom poddano polimery jako materiały będące przedmiotem badań przepływowych. W tej części pracy skupiono się na właściwościach polimerów, ich degradacji oraz przetwórstwie.

Rozdział trzeci prezentuje cel i zakres pracy, czyli najważniejsze zadania dotyczące przeprowadzenia badań.

Kolejne trzy rozdziały zostały utworzone w oparciu o wykonane badania wizualizacyjne, symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne. W rozdziale czwartym wykonano symulację na autorskim stanowisku wizualizacyjnym z wymiennymi elementami kanałów. Do badań wykorzystano wodę z opiłkami proszku aluminiowego w celu analizy charakteru przepływającego płynu. Wizualizację uzupełniono o wyniki symulacji komputerowej, w której odzwierciedlono geometrię kanałów zastosowaną na stanowisku laboratoryjnym. W wynikach symulacji zestawiono przepływ dwóch płynów – newtonowskiego (wody) oraz nienewtonowskiego (wodny roztwór karboksymetylocelulozy) w celu ich porównania.

Rozdział piąty zawiera procedurę wykonania badań oraz wyniki uzyskane przy wykorzystaniu symulacji komputerowej w środowisku CFD (ang. Computational Fluids

Dynamics). Zadanyimi parametrami przepływu jest geometria dyszy, właściwości fizyczne płynu nienewtonowskiego, model lepkości płynu, prędkość płynu na wlocie do dyszy oraz temperatura. W badaniu tym użyto sześciu różnych geometrii kanału – trzy dysze zbieżne oraz trzy dysze opisane równaniem wielomianowym. Wynikiem symulacji jest rozkład ciśnienia oraz prędkości płynu.

W rozdziale szóstym przedstawiono specyfikację aparatury niezbędnej do przeprowadzenia badań na stanowisku laboratoryjnym – w reometrze kapilarnym, a także charakterystykę polipropylenu – materiału użytego w próbach badawczych. W rozdziale tym zaprezentowano także autorskie dysze, które służą jako elementy wymienne, umieszczane w reometrze. Wynikiem badania są wartości ciśnienia uzależnione od zadanego przepływu oraz kształtu dyszy.

Rozdział siódmy porusza kwestię wpływu wytłaczania w nowo powstałych kształtach na degradację materiału. Analiza dotyczy degradacji termicznej oraz mechanicznej.

W końcowej części pracy zawarto omówienie wyników badań, czyli zbioru danych pozyskanych w symulacji komputerowej i badaniach na stanowisku laboratoryjnym – reometrze. Elementem wspólnym obu badań jest geometria sekcji badawczej. Na podstawie zestawienia wyników sformułowano odpowiednie wnioski.